

external and internal demagnetizing magnetic fields. The calculation of the external and internal demagnetizing fields for an elementary magnetic system of a magnetic mass bearing consisting of two coaxially arranged magnets of various shapes is carried out. Applying the results of the work, it is possible to determine the optimal size of madness of various shapes for magnetic bearings.

Keywords: magnetoforce devices, magnetopassive bearings, demagnetizing magnetic fields, coercive force, magnetization.

Поступила в редакцию/received: 08.04.2025; после рецензирования/revised: 25.04.2025;
принята/accepted: 30.04.2025

УДК 620.179.118.2

DOI: 10.46573/2658-5030-2025-4-21-28

О ПАРАМЕТРАХ МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ РЕЗКИ

В.В. ИЗМАЙЛОВ, д-р техн. наук, **М.В. НОВОСЕЛОВА**, канд. техн. наук

Тверской государственный технический университет,
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: iz2v2@mail.ru

© Измайлов В.В., Новоселова М.В., 2025

Приведены результаты исследования микрорельефа поверхностей образцов из титанового сплава после операции электроэрозионной резки. Определен набор стандартных и нестандартных параметров профиля микрорельефа, а также их соотношений, по которым можно судить о характере профиля шероховатости. Показано, что распределение ординат профиля хорошо описывается нормальным распределением, а также бета-распределением. Это дает основания представить профиль исследованной поверхности в виде широкополосного нормального случайного процесса и использовать возможности данной модели для статистической оценки дополнительных параметров шероховатости. Показано также, что параметры шероховатости поверхностей после электроэрозионной резки сопоставимы с аналогичными параметрами поверхностей после газолазерной резки и механической обработки (шлифования), и это свидетельствует об их общей стохастической природе.

Ключевые слова: титановый сплав, электроэрозионная резка, шероховатость, статистические параметры, профильный метод.

ВВЕДЕНИЕ

Микрорельеф технической поверхности (волнистость, шероховатость, суб-шероховатость) является одной из основных характеристик ее качества и определяет многие ее свойства – от чисто декоративных до принципиально важных эксплуатационных. Параметры микрорельефа, определяющие эксплуатационные свойства поверхности, зависят как от режимов технологической обработки поверхности, так и от свойств обрабатываемого материала. Связь технологических режимов обработки технических поверхностей и параметров их качества была и остается предметом многочисленных исследований. Наиболее изучены поверхности после различных видов механической обработки, однако с появлением новых технологических методов обработки и новых методов исследования качества

получаемой поверхности возникает необходимость в продолжении работы в этом направлении.

Одним из таких менее исследованных в плане качества получаемой поверхности технологических методов является электроэрозионная обработка и, в частности, такая ее разновидность, как электроэрозионная резка. Механизм образования микрорельефа поверхности в процессе электроэрозионной обработки принципиально отличается от аналогичного механизма в процессе механической обработки. Во втором случае микрорельеф формируется в основном в результате механического воздействия инструмента на материал обрабатываемой поверхности, тогда как в первом – главным образом в результате термического воздействия электрических разрядов. В связи с этим возникает вопрос о применимости параметров шероховатости, характеризующих качество поверхности после механической обработки, к поверхности после электроэрозионной обработки, в частности, после электроэрозионной резки [1].

Процессы обработки технических поверхностей объединяет то обстоятельство, что на них влияют несколько факторов, носящих в основном случайный характер, что определяет также случайный характер формируемого микрорельефа поверхности. В связи с этим при исследовании шероховатости технических поверхностей возможно применение модели шероховатости как случайного поля, а профиля шероховатости – как случайного процесса [2, 3]. Такой вероятностно-статистический подход универсален и применим к шероховатости любого происхождения.

Цель данной работы – исследование характера шероховатости металлической поверхности после электроэрозионной резки с определением стандартных и нестандартных параметров и сравнение их с аналогичными параметрами шероховатости поверхностей после других видов обработки.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Объектом исследования являлась поверхность образца титанового сплава ВТ6 после операции электроэрозионной резки на прошивочно-вырезном электроэрозионном станке DK7750 при токе 5 А.

Параметры шероховатости определялись профильным методом с помощью профилометра контактного модели 130. Несмотря на имеющиеся современные технические возможности пространственной оценки структуры поверхностей, профильный метод по-прежнему широко применяется для исследования качества технических поверхностей [4].

На основании ГОСТ Р ИСО 4287-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности», который содержит наиболее полный набор параметров, определялись следующие параметры микрорельефа:

Ra – среднее арифметическое отклонение оцениваемого профиля;

Rp – максимальная высота пика профиля;

Rv – наибольшая глубина впадины профиля;

Rz – максимальная высота профиля ($Rz = Rp + Rv$);

Rc – средняя высота элементов профиля;

RSm – средняя ширина элементов профиля.

Параметр Ra характеризует среднюю амплитуду профиля шероховатости, определяется усреднением по большому объему выборки и поэтому статистически весьма устойчив: единичные нетипичные пики или впадины несущественно влияют на его значение. В то же время данный параметр практически не несет информации о

форме элементов профиля и может принимать одинаковые значения для совершенно разных по характеру профилей.

Параметры R_p , R_v и R_z являются экстремальными, т. е. определяются единственным значением в пределах базовой длины, поэтому статистически нестабильны.

Параметр R_{Sm} статистически более устойчив, так как определяется средним значением в пределах базовой длины.

Помимо дискретных (точечных) параметров качества поверхности определяли весьма информативную интегральную характеристику – так называемую кривую коэффициента смятия профиля, более известную в трибологии и других приложениях как опорная кривая или кривая Эбботта – Файрстоуна. Кривую коэффициента смятия профиля (опорную кривую) согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 можно интерпретировать как интегральную функцию распределения случайной величины – ординаты профиля $Z(x)$ – в пределах длины оценки.

В дополнение к стандартным параметрам определяли также набор нестандартных величин:

v – показатель степени степенной аппроксимации начального участка опорной кривой;

$Rmr(m)$ – коэффициент смятия профиля на уровне средней линии mm , равный отношению опорной длины материала элементов профиля на уровне средней линии к длине оценки. В литературе по качеству технических поверхностей для этого параметра также используется обозначение t_m ;

n_0 – число нулей профиля (число пересечений профиля средней линией) в расчете на единицу длины;

m – число локальных максимумов профиля в расчете на единицу длины;

r_m – средний радиус кривизны вершин выступов (пиков) профиля.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Стандартные параметры шероховатости исследуемой поверхности представлены в табл. 1. Их значения приведены с величинами стандартных отклонений, которые не превышают 15 %, что свидетельствует об однородности шероховатости.

Таблица 1. Параметры шероховатости поверхности после электроэрозионной резки

Ra , мкм	R_p , мкм	R_v , мкм	R_z , мкм	R_c , мкм	R_{Sm} , мм
$2,0 \pm 0,1$	$9,8 \pm 0,8$	$9,6 \pm 1,4$	$19,4 \pm 1,8$	$7,8 \pm 0,2$	$0,13 \pm 0,03$

Типичные кривые коэффициента смятия профиля (опорные кривые) приведены на рис. 1 в относительных координатах $(1 - \varepsilon) = f(tp)$, где $\varepsilon = p / R_z$; $tp = \frac{\sum_1^n b_i}{ln}$; p – уровень сечения профиля, отсчитанный от уровня вершины максимального выступа; $\sum_1^n b_i$ – сумма длин отрезков, отсекаемых на уровне p линией, эквидистантной средней линии; ln – длина оценки.

На рис. 2 обобщенная опорная кривая представлена в ином виде – как интегральная функция распределения $F(z)$ относительной случайной величины $z = Z / R_z$, где Z – абсолютная ордината профиля, а на рис. 3 приведена соответствующая функция плотности вероятности $f(z)$ в виде полигона распределения вероятностей.

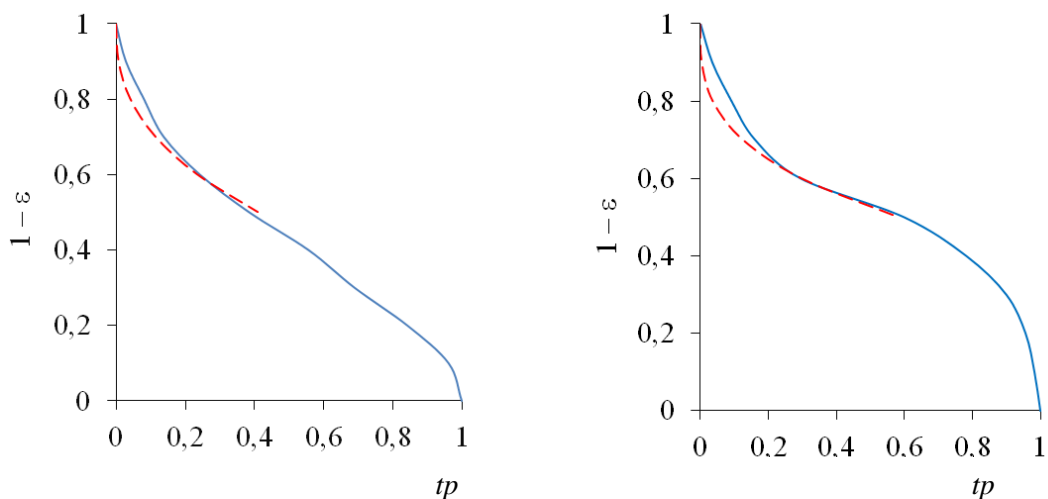


Рис. 1. Примеры опорных кривых профиля шероховатости поверхности реза в двух взаимно перпендикулярных направлениях: пунктирная линия – экспериментальная кривая; сплошная – степенная аппроксимация начального участка

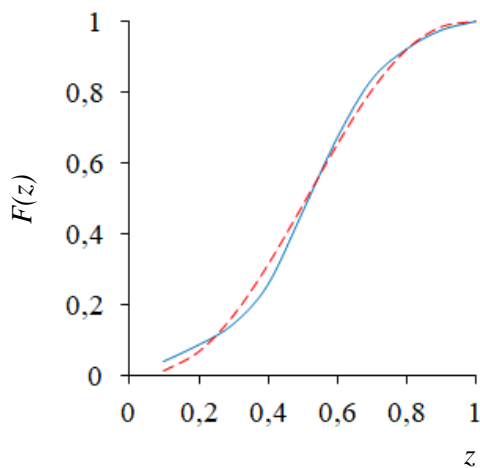


Рис. 2. Интегральная функция распределения ординат профиля: сплошная линия – экспериментальная кривая; пунктирная – бета-распределение

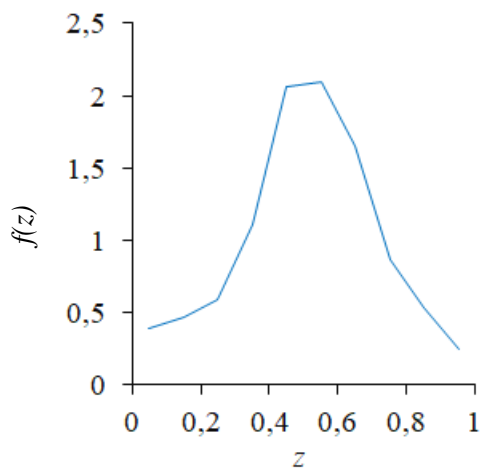


Рис. 3. Полигон распределения вероятностей ординат профиля

На рис. 4 представлено сопоставление интегральной функции распределения ординат профиля шероховатости исследованной поверхности с нормальной функцией распределения. Наблюдаются лишь незначительные отклонения распределения ординат профиля исследуемой поверхности от нормального распределения, проверка по критерию Лиллиефорса [5, 6] показала, что гипотеза о нормальном распределении ординат профиля не противоречит экспериментальным данным.

Отметим, что распределение ординат профиля поверхности реза также хорошо аппроксимируется бета-распределением (см. рис. 2):

$$f(z) = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} z^{\alpha-1} (1-z)^{\beta-1},$$

где $B(\alpha, \beta)$ – бета-функция; $\alpha = 2,68$; $\beta = 2,57$.

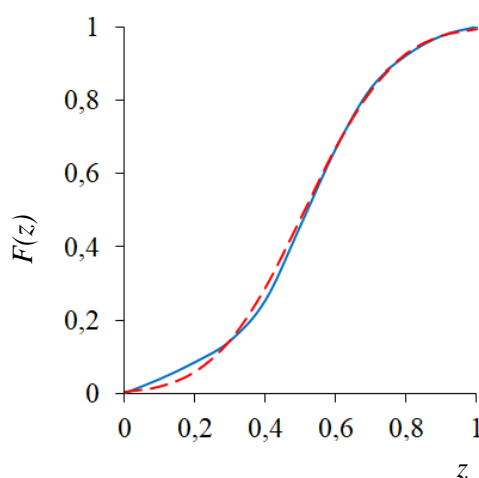


Рис. 4. Интегральная функция распределения ординат профиля поверхности реза (сплошная линия) в сравнении с нормальной функцией распределения (пунктирная)

Нестандартные параметры шероховатости исследуемой поверхности приведены в табл. 2.

Таблица 2. Нестандартные параметры шероховатости поверхности после электроэрозионной резки

ν	$Rmr(m) \equiv tm$	$n_0, \text{мм}^{-1}$	$m, \text{мм}^{-1}$	$r_m, \text{МКМ}$
$3,2 \pm 0,5$	$0,44 \pm 0,05$	$15,0 \pm 1,4$	$15,5 \pm 2,4$	110 ± 12

Параметр степенной аппроксимации начального участка опорной кривой ν рассчитывали по формуле [7]:

$$\nu = 2t_m \left(\frac{R_p}{R_a} - 1 \right).$$

Рассчитанное таким образом по параметрам шероховатости R_p , R_a и tm значение $\nu = 3,2$ практически совпадает со значением $\nu = 3,1$, соответствующим параметрам бета-распределения $\alpha = 2,68$; $\beta = 2,57$ [8].

Параметры n_0 и m определены непосредственно по профилограммам исследуемой поверхности, средний радиус кривизны вершин пиков профиля r_m рассчитан по формуле [9]:

$$r_m = (2\pi^2 \overline{R_a} \overline{n_0} \overline{m})^{-1}, \quad (1)$$

где $\overline{R_a}$, $\overline{n_0}$, \overline{m} – математические ожидания соответствующих величин.

Формула (1) получена на основании модели профиля шероховатой поверхности как нормального стационарного случайного процесса [9]. Данная модель успешно применяется для анализа микрорельефа технических поверхностей [2, 3] и позволяет сделать некоторые выводы о характере профиля исследуемой поверхности, которые приведены ниже.

Параметр $\lambda = \frac{\overline{n_0}}{\overline{m}}$ теоретически изменяется в пределах $0 \leq \lambda \leq 2$ и имеет важное значение в теории случайных процессов, так как характеризует ширину спектра процесса (в данном случае профиля): малые значения λ соответствуют широкополосному спектру, значения λ , близкие к верхней границе, – узкополосному, в пределе монохроматическому спектру (один пик между двумя нулями). Для исследованной поверхности $\lambda = 1,01 \pm 0,18$, откуда можно заключить, что профиль имеет как случайную, так и регулярную составляющую.

Параметр n_0 позволяет оценить статистически нестабильную величину R_p – максимальную высоту пика профиля – по намного более стабильной величине R_a [9]:

$$\overline{R_p} \approx \overline{R_a} \sqrt{\pi \ln \left(\frac{l_n \overline{n_0}}{2} \right)}, \quad (2)$$

где l_n – длина оценивания. Такая оценка позволяет отсеять отдельные нетипичные выступы, не влияющие на эксплуатационные свойства поверхности. Согласно формуле (2) для исследуемой поверхности отношение $\frac{\overline{R_p}}{\overline{R_a}} \approx 3 - 3,8$, что меньше соответствующего значения по данным табл. 1.

Для полноты анализа сравним параметры шероховатости исследованной поверхности после электроэрозионной резки с типичными параметрами шероховатости после механической обработки [9] и лазерной резки [10] (табл. 3). Для сравнения выбраны поверхности, имеющие близкие значения параметра R_a . В основном сопоставлены не абсолютные значения параметров, а их соотношения, что более информативно, так как первые зависят в основном от режимов обработки, тогда как вторые – от характера шероховатости.

Таблица 3. Параметры шероховатости и их соотношения

Обработка	R_a , мкм	R_p / R_a	RS_m / R_a	$Rmr(m) \equiv tm$	v	λ	r_m , мкм
Электроэрозионная резка	2,0	4,9	70	0,44	3,2	1,01	110
Лазерная резка	2,5	4,8	125	0,40	2,8	1,0–1,4	140
Механическое шлифование	2,51	4,5	53	0,50	3,4	0,94	83

Практически все относительные значения для трех различных по физическому принципу технологических процессов обработки поверхностей близки, за исключением отношения шагового параметра RSm к высотному параметру Ra . По-видимому, это следствие того, что параметр RSm связан с продольным (вдоль поверхности) движением инструмента и более детерминирован, чем параметр Ra . Сходство параметров λ для сравниваемых поверхностей свидетельствует о близком спектральном составе профиля, а сходство параметров опорной кривой – о сходном характере распределения ординат профиля, что позволяет считать правомерным применение модели нормального случайного процесса к профилю всех сравниваемых поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенные в ходе исследований рельефа поверхности титанового сплава ВТ6 после электроэрозионной резки стандартные и нестандартные параметры профиля шероховатости, а также соотношения некоторых параметров свидетельствуют о том, что к данному профилю применима модель случайного широкополосного нормального процесса. Этот вывод подтверждается сравнением соответствующих параметров профиля с параметрами поверхности после механической обработки (шлифования), для которой данная модель успешно применялась многими исследователями. Достоинство этой вероятностно-статистической модели в ее универсальности и независимости от происхождения конкретной технической поверхности.

В работе не ставилась задача исследовать связь конкретных параметров профиля шероховатости с режимами электроэрозионной обработки, что целесообразно выбрать в качестве направления дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Серебrenицкий П.П. Современные электроэрозионные технологии и оборудование: учебное пособие. СПб.: Лань, 2022. 352 с.
2. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2009. 472 с.
3. Хусу А.П., Витенберг Ю.Р., Пальмов В.А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.
4. Иванов И.А., Губенко С.И., Кононов Д.П. Поверхность деталей машин и механизмов: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2021. 156 с.
5. Lilliefors H.W. On the Kolmogorov – Smirnov test for normality with mean and variance unknown // *Journal of the American Statistical Association*. 1967. V. 62. № 318. P. 399–402.
6. Gibbons J.D., Chakraborti S. Nonparametric Statistical Inference. New York: Marcel Dekker, 2003. 646 p.
7. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Основы механики и физики контактного взаимодействия, трения и изнашивания технических поверхностей: учебное пособие для вузов. СПб.: Лань, 2025. 172 с.
8. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Опорная кривая и бета-распределение высот и радиусов вершин выступов шероховатой поверхности // *Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования*. 2018. Вып. 11. С. 4–10.

9. Рудзит Я.А. Микрогеометрия и контактное взаимодействие поверхностей. Рига: Зинатне, 1975. 210 с.

10. Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Измайлов В.В., Барчуков Д.А. Исследование триботехнических свойств поверхностей, полученных воздействием концентрированных потоков энергии: монография. Тверь: ТвГТУ, 2022. 164 с.

Для цитирования: Измайлов В.В., Новоселова М.В. О параметрах микрорельефа поверхности металла после электроэрозионной резки // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2025. № 4 (28). С. 21–28.

ON THE PARAMETERS OF THE MICRORELIEF OF THE METAL SURFACE AFTER ELECTRIC DISCHARGE WIRE CUTTING

V.V. IZMAILOV, Dr. Sc., M.V. NOVOSELOVA, Cand. Sc.

Tver State Technical University,
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: iz2v2@mail.ru

The article presents the results of the study of the microrelief of the surfaces of titanium alloy samples after electrical discharge wire cutting. A set of standard and non-standard parameters of the microrelief profile, as well as their ratios, is determined, by which one can judge the nature of the roughness profile. It is shown that the distribution of the profile ordinates is well described by the normal distribution, as well as by the beta distribution. This gives grounds to represent the profile of the studied surface as a broadband normal random process and to use the capabilities of this model for the statistical assessment of additional roughness parameters. It is also shown that the roughness parameters of the surfaces after electrical discharge cutting are comparable with similar parameters of the surfaces after gas-laser cutting and mechanical processing (grinding), which indicates their common stochastic nature.

Keywords: titanium alloy, electrical discharge wire cutting, roughness, statistical parameters, profile method.

Поступила в редакцию/received: 20.06.2025; после рецензирования/revised: 30.06.2025;
принята/accepted: 02.07.2025